

УДК 549.514.81:522.321.1

*А. М. Беляев***К ВОПРОСУ О ГЕНЕЗИСЕ ОВОИДОВ К-ПОЛЕВОГО ШПАТА  
И ПОРФИРОВИДНОГО КВАРЦА В ГРАНИТАХ РАПАКИВИ  
И РОДСТВЕННЫХ ПОРОДАХ**

Санкт-Петербургский государственный университет,  
Российская Федерация, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9

Сравнительное изучение структурных особенностей овоидов калиевого полевого шпата и порфировидного кварца из гранитов рапакиви различных массивов (Аландский, Выборгский, Салминский — Балтийский щит и Бердяушский — Южный Урал), а также гибридных пород различного генезиса позволило уточнить их роль в формировании рапаквивгранитных комплексов.

Показано, что порфировидный кварц, овоиды КПШ и плагиоклазовые оболочки на них были сформированы до начала кристаллизации остаточного котектического расплава гранитов рапакиви. В магматогенных композитных гибридных породах ксенокристаллы-овоиды КПШ претерпели распад твердого раствора с образованием вторичных криптопертитов плагиоклаза, а в ксенокристаллах кварца происходила декрипитация первичных флюидных включений и образование новых вторичных высокотемпературных включений. В гибридных композитных метасоматитах, сформировавшихся по метаморфическим и основным магматическим породам, овоидоподобные порфиروبласты КПШ (в том числе с плагиоклазовыми оболочками), а также порфировидный кварц (в том числе глазковый) кристаллизовались из растворов. При этом в кристаллах кварца присутствуют первичные включения (отрицательные кристаллы) тригональной симметрии, характерные для низкотемпературной  $\alpha$ -модификации. Библиогр. 24 назв. Ил. 9. Табл. 2.

**Ключевые слова:** граниты рапакиви, овоиды, порфиروبласты, гибридные породы, метасоматиты.

*А. М. Belyaev***ABOUT THE GENESIS OF OVOIDAL K-FELDSPAR AND PORPHYRY QUARTZ IN RAPAKIVI  
GRANITES AND RELATED ROCKS**

St Petersburg State University,  
7–9, Universitetskaya nab., St. Petersburg, 199034, Russian Federation

A comparative study of structural peculiarities of ovoid K-feldspar porphyry and quartz of rapakivi granite of different arrays (Aland, Vyborg, Salmi batholith rapakivi of the Baltic shield and Bardiaush batholith rapakivi of the South Ural), and hybrid rocks of various genesis allowed us to clarify their role in the formation of rapakivi granite complexes.

It was established, that the porphyritic quartz and ovoides of K-feldspar and their plagioclase shell was formed before the crystallization of the residual cotectic melt of rapakivi granite. In the composite hybrid magmatic rocks xenocryst K-spar have undergone a disintegration of solid solution with for-

mation of a secondary cryptoperthite plagioclase. And xenocrystic quartz was subject to decrepitation by primary fluid inclusions and the formation of new secondary high-temperature inclusions. In a hybrid composite rocks formed as metamorphic and basic igneous rocks ovoid-like porphyroblast K-spar (including plagioclase shells) and quartz porphyry (including the 'ocelly') was crystallized from solution. In the crystals of quartz primary inclusions (negative crystals) of trigonal symmetry were present, typical for low-temperature  $\alpha$ -modification. Refs 24. Figs 9. Tables 2.

*Keywords:* granite rapakivi, ovoides, porphyroblast, hybrid rocks, metasomatic rocks.

## Введение

Международный комитет геологической корреляции ЮНЕСКО отнес к числу приоритетных задач мировой геологии проблему генезиса гранитов рапакиви и родственных пород, так как их массивы представляют значительную часть земной коры и играют важную роль в докембрийской эволюции литосферы. Кроме того, с гранитами рапакиви в пространстве и времени ассоциируют рудные месторождения, а также целый спектр горных пород: габбро-анортозиты, монцонитоиды [1–3], щелочные и нефелиновые сиениты [4], а также гибридные магматические [5–7] и метасоматические породы [8, 9], основные и кислые вулканиты [10]. В работах последних десятилетий (проекты IGCP-315 «Correlation of Rapakivi Granites and Related Rocks on a Global Scale», а также IGCP-373, IGCP-426, IGCP-510) установлено, что общим для всех рапакивигранитных ассоциаций является их зарождение в пределах кратонизированных плит в условиях растяжения земной коры. При этом большинство исследований были посвящены изотопно-геохимическому моделированию формирования рапакивигранитных комплексов под воздействием сублитосферных мантийных источников на породы нижней части земной коры [2–11]. В связи с этим большое внимание уделялось изучению геохимии процессов смешения сосуществующих базитовых и гранитных расплавов [11].

Вместе с тем физико-химические условия формирования рапакивигранитных комплексов тем или иным образом зафиксированы в особенностях минерального состава и структуры пород, поэтому их изучение по-прежнему является ключевым для решения проблемы в целом. Главной структурной особенностью ранних фаз гранитов рапакиви являются мегакристаллы-овоиды калиевого полевого шпата (КПШ), окаймленные плагиоклазовыми оболочками. Они встречаются и в гибридных композитных породах [5–9], однако традиционно химический состав К-полевого шпата изучался для оценки физико-химических условий формирования гранитов рапакиви [12]. Вместе с тем структурные особенности минералов также отражают термодинамические условия их кристаллизации. В связи с этим для оценки условий формирования рапакивигранитных комплексов проведено сравнительное изучение рентгеноструктурных особенностей овоидов калиевого полевого шпата и порфиroidного кварца из гранитов рапакиви и гибридных пород различных массивов: Аландского, Выборгского, Салминского (Балтийский щит) и Бердяушского (Южный Урал).

## Овоиды КПШ в гранитах рапакиви

Собственно рапакиви принято называть крупно-гигантозернистые порфиroidные амфибол-биотитовые граниты (выборгиты) с округлыми часто зональными мегакристаллами КПШ, часть из которых окружена олигоклазовыми оболочка-

ми. КПШ также присутствует в разномзернистой основной массе породы. Разными авторами образование овоидов КПШ трактовалось в соответствии с их взглядами на генезис гранитов рапакиви, опирающимися в основном на геодинамические и изотопно-геохимические модели. Одни авторы считают, что граниты рапакиви и, соответственно, овоиды КПШ кристаллизовались из гранитного расплава на уровне становления интрузии [1, 3, 12, 13]. Серьезным геологическим подтверждением этой гипотезы было описание краевой мелкоовоидной фации гранитов рапакиви в Выборгском массиве [14]. Другие авторы развивают представления о формировании гранитов рапакиви в процессе калий-кремниевых метасоматоза в твердой породе основного состава и рассматривали овоиды КПШ как порфиробласты [15]. По мнению Н. Г. Судовикова, овоиды образовались в результате глубинного калий-кремниевых метасоматоза метаморфических пород и последующего частичного плавления гранитизированных толщ. Это приводило сначала к оплавлению порфиробласт КПШ при подъеме магмы с ксенокристаллами, а на уровне становления интрузии — к их дорастанию из расплава [16]. На примере Бердяшского массива было показано, что при гранитизации катаклазированных габброидов кремне-калиевым флюидом в них формировались метасоматические порфиробласты КПШ и кварца. При дальнейшем частичном плавлении гранитизированных зон возможно образование рапакивигранитных расплавов, содержащих ксенокристаллы исходного субстрата [17].

Вопрос о механизме образования плагиоклазовых оболочек также многократно обсуждался в научной литературе. Одни исследователи считают возможным их кристаллизацию из расплава [1, 3, 12, 13], другие рассматривают механизм их кристаллизации в твердом субстрате в процессе метасоматоза или эксолуции КПШ [15]. В настоящее время имеется много фактов, указывающих на то, что плагиоклазовые оболочки на овоидах формировались из магмы до начала кристаллизации остаточного гранитного расплава. Так, плагиоклазовыми оболочками окружены ксенолиты мелкозернистого гранита в выборгитах (рис. 1) [13]. Есть находки овоидов с двойной плагиоклазовой оболочкой в гранитах Выборгского массива (рис. 1).

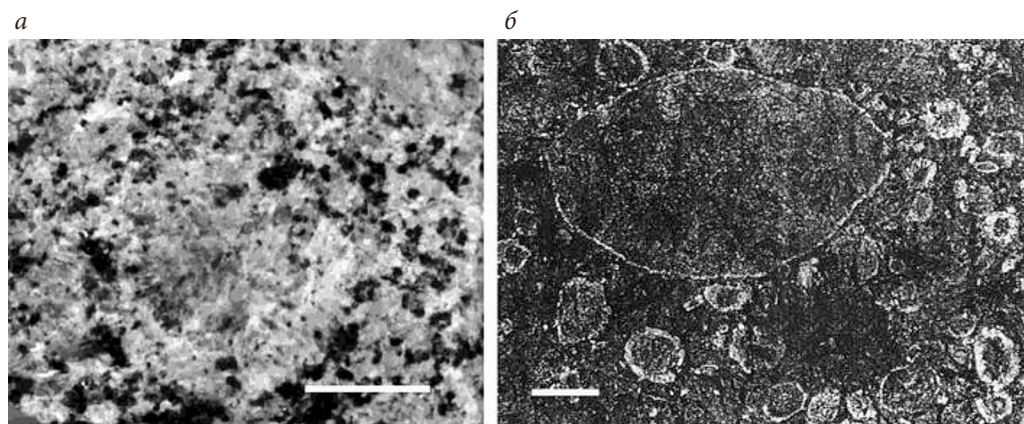


Рис. 1. Овоид КПШ с двойной плагиоклазовой оболочкой, Выборгский массив, трахитоидный гранит (а). Ксенолит мелкозернистого гранита в овоидном граните рапакиви, окруженный плагиоклазовой оболочкой, образец А. Ворма из минералогического музея геологической службы Финляндии (б). Масштабная линейка — 3 см

В Салминском массиве (Карелия) овоиды КППШ, в том числе и с плагиоклазовыми оболочками, присутствуют в дайке орбикулярных гранитов рапакиви (рис. 1, *а*) [18]. Формирование последних происходило в условиях растяжения земной коры. Внедрение остаточного гранитного расплава, содержащего овоиды КППШ с плагиоклазовыми оболочками, в расширяющуюся трещину сопровождалось резким снижением давления, при котором происходило вскипание магмы и выделение летучих компонентов в самостоятельную флюидную фазу. Это приводило к быстрой кристаллизации остаточного котектического расплава на ксенокристаллах-овоидах КППШ, в том числе и с плагиоклазовыми оболочками, служивших центрами кристаллизации для кварц-полевошпатового гранофира (рис. 2, *а*) [18].

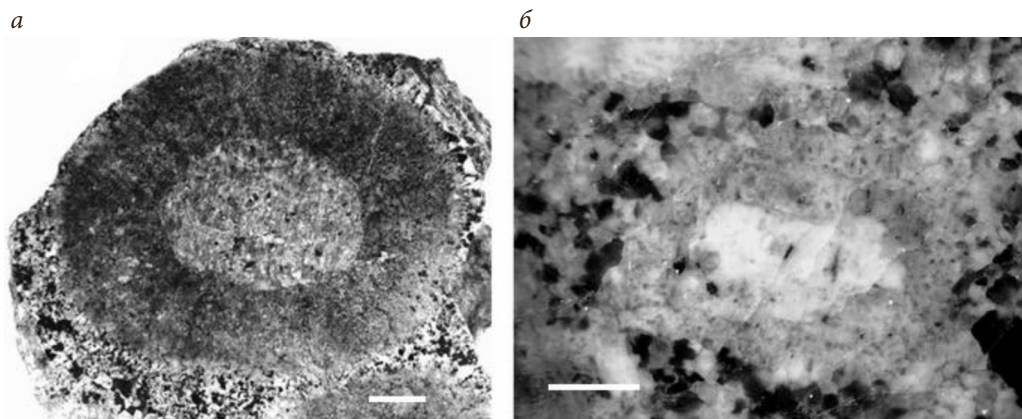


Рис. 2. Овоид КППШ в орбикулярном граните, окруженный оболочкой из кварц-полевошпатового гранофира (*а*). Край овоида с плагиоклазовой оболочкой, окруженный каймой из кварц-полевошпатового гранофира, в зоне эндоконтакта Салминского массива (*б*). Масштабная линейка — 1 см

Подобные структуры присутствуют также в породах зоны эндоконтакта гранитов Салминского массива. Кварц-полевошпатовым гранофиром окружены не только овоиды КППШ с плагиоклазовыми оболочками, но и агрегаты минералов крупнозернистой основной массы (рис. 2, *б*).

Таким образом, формирование овоидов КППШ, в том числе и с плагиоклазовыми оболочками, в гранитах рапакиви, вероятнее всего закончилось до кристаллизации остаточного котектического расплава.

О начальных стадиях кристаллизации овоидов КППШ могут косвенно свидетельствовать минералого-геохимические особенности эффузивных аналогов гранитов рапакиви — риолитов. Геологические, геохимические и изотопно-геохимические исследования вулканитов о. Гогланд подтвердили, что порфировые риолиты (1638–1640 млн лет) образовались из магмы родоначальной для овоидных гранитов рапакиви Выборгского массива [10]. В тонкозернистой, часто стекловатой основной массе риолитов наблюдаются вкрапленники калиевого полевого шпата ортоклаз-пертита (0.5–2.5 см в поперечнике) и кварца (0.1–0.5 см в поперечнике) составляющие 5–10% и 3–10% объема породы соответственно. Вкрапленники КППШ и кварца часто имеют заливы (cavities), выполненные микрокристаллической основной массой (рис. 3, *в*, *г*). Такие заливы, как правило, образуются при растворении вкра-



пленников под действием неравновесного с ними расплава и обрастают снаружи зональным калиевым полевым шпатом или кварцем. Подобные явления наблюдаются в субвулканических кварцевых порфирах комплекса Хаммаруда Аландского массива рапакиви (Финляндия), микрогранитах Альтенберг (Германия) и др. [5, 7].

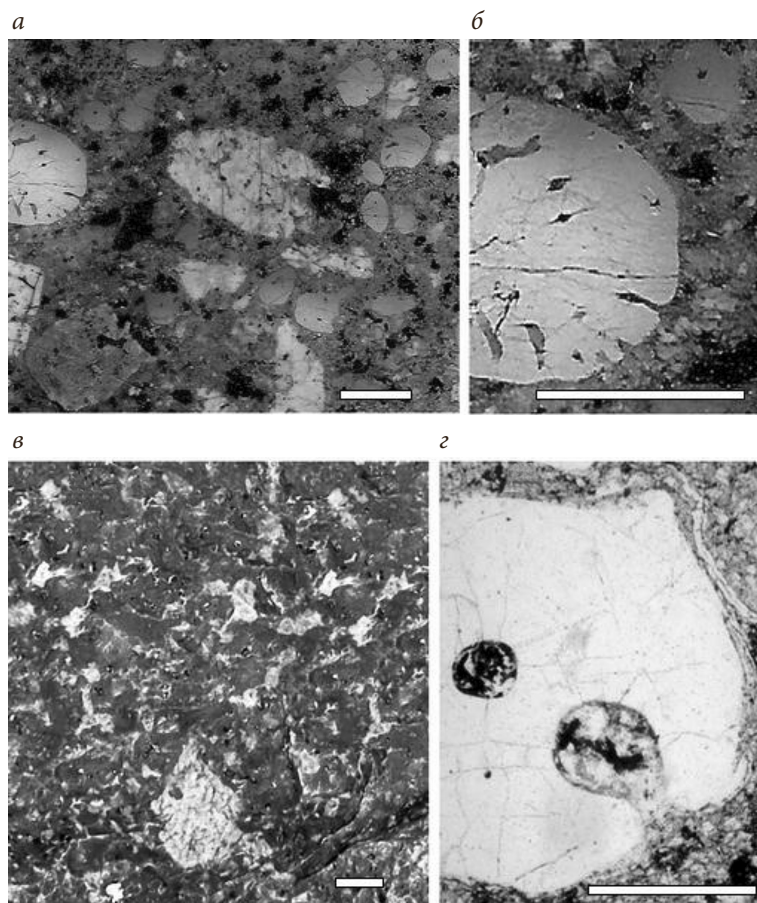


Рис. 3. Вкрапленники КПШ и кварца с заливами выполненными микрокристаллической основной массой: а, б — в кварцевых порфирах комплекса Хаммаруда Аландского массива рапакиви; в, з — в порфировых риодацитах о. Гогланд Выборгского массива гранитов рапакиви. Масштабная линейка — 1 см

Для Салминского и Выборгского массивов установлено закономерное уменьшение содержания Ва (от 1500 до 100 г/т) и Sr (от 200 до 10 г/т) от ранних гранитных фаз к поздним и от крупнозернистых разновидностей к порфировидным и жильным. При этом содержание рубидия, напротив, увеличивается (от 200 до 900 г/т) [3, 4]. Такая же тенденция характерна и для КПШ овоидов: в зональных кристаллах, от центральных частей к краевым, наблюдается закономерное уменьшение содержания Ва и Sr (табл. 1). При этом самое высокое содержание Ва и Sr, при самом низком содержании Rb, характерно для КПШ из центральных частей крупных овоидов [19]. Содержание бария, стронция и рубидия в калиевых полевых шпатах из вкра-

пленников в риолитах о. Гогланд близко к калиевым полевым шпатам из центральных частей овоидов Выборгского массива, что дает основание предположить их генетическое родство.

Таблица 1. Содержание Ba (%), Rb и Sr (г/т) в КППШ из гранитов рапакиви и родственных пород

	Риолиты Гогланда	Выборг- ский массив овоиды из выбор- гитов	Салминский массив				
			Мегакристы из монцони- тов	Овоиды из выбор- гитов	Орбикулярный гранит		Порфи- р- бласти в роговиках
					овоиды	гранофир	
Ba	0.5–1	0.5–1,3	0.26–0.52	0.2–0.7	0.5–0.9	0.08–0.1	0.27–1.2
Rb	340–400	510–590	200–300	200–300	300–400	300	200–300
Sr	220–310	200–300	200–300	200–300	300–400	100–200	350–360

Расчетными методами показано, что при подъеме рапакивигранитной магмы должна происходить субизотермическая декомпрессия расплава, при которой возможно оплавление интрателлурических вкрапленников кварца и полевого шпата [20]. Это подтверждается термобарометрическими исследованиями на примере нескольких рапакивигранитных массивов Балтийского щита [21]. Было установлено, что минеральные включения во внутренних частях овоидов КППШ нередко кристаллизовались при более низких температурах и более высоких значениях давления ( $T = 680\text{--}720^\circ\text{C}$ ,  $P = 5\text{--}6$  кбар) по сравнению с их периферией и олигоклазовыми оторочками ( $T = 780^\circ\text{C}$ ,  $P = 3,5\text{--}1$  кбар). Это предполагает, что формирование ядер овоидов произошло на глубине, с которой они магматическими токами были вынесены в другую, менее глубинную камеру [21].

Таким образом, кристаллы КППШ и кварца в риолитах могли представлять собой либо интрателлурические вкрапленники, образовавшиеся на глубине до излияния магмы, либо ксенокристы — нерасплавленные минералы исходного протолита, из которого выплавлялась рапакивигранитная магма. Впоследствии, при формировании интрузива рапакиви, вкрапленники КППШ и кварца могли служить центрами кристаллизации для части овоидов и порфировидного кварца гранитов.

### Морфологические особенности овоидов КППШ и порфировидного кварца в магматогенных гибридных породах

В полимодальных магматических комплексах рапакиви часто встречаются весьма специфические магматические гибридные породы — базальты, содержащие овоиды К-полевого шпата и порфировидного кварца. Ксенокристаллы попадают в базальтовую магму при внедрении ее в не полностью закристаллизовавшиеся граниты. Такие случаи известны в массивах Суоменниеми [5] и Хаммаруда на Аландских островах [7] (Финляндия, Салми). По данным О. Эклунда, минералы гранитов легко преодолевают фазовую границу между расплавами и проникают в базальтовую магму. Одной из характерных морфологических особенностей гибридных базальтов являются ксенокристы кварца, окруженные каемками из мелких кристаллов амфибола — «глазковый» или «ocelly» кварц (рис. 4, а) [7, 9].

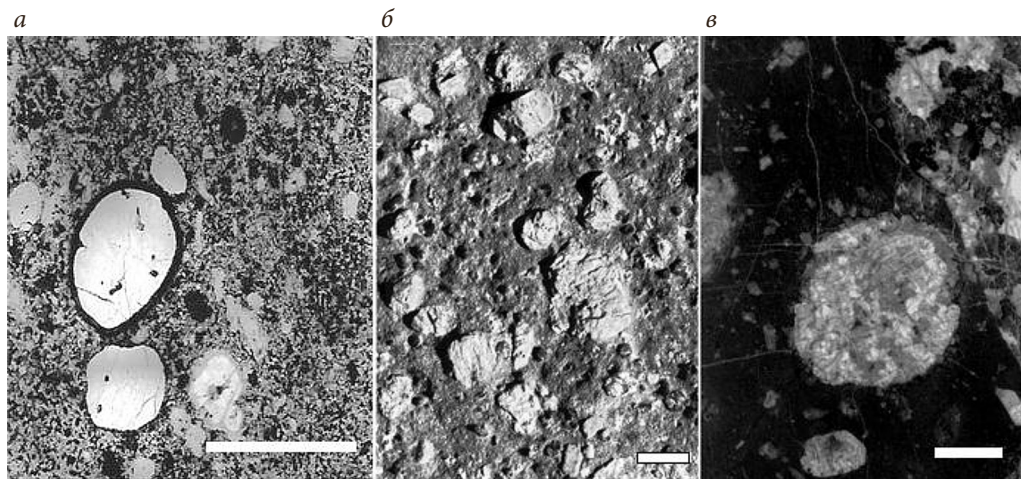


Рис. 4. Магматогенные композитные гибридные породы: *а* — «глазковый» или «ocelly» кварц в базальтах (Аландский массив рапакиви); *б* — ксенокристы К-полевого шпата и кварца в диабазах гибридной дайки (Салминский массив рапакиви) выветренная поверхность; *в* — овоид КППШ с плагиоклазовой оболочкой в контакте дайки с овоидными гранитами рапакиви. Масштабная линейка — 1 см

Подобные ксенокристаллы присутствуют в диабазах гибридных даек, прорывающих овоидные амфибол-биотитовые граниты рапакиви Салминского массива [6]. В мелкозернистом диабазе содержатся кристаллы КППШ и глазковый кварц, окруженный каймой амфибола. В ксенокристаллах КППШ наблюдаются ленточные пертиты, как и в овоидах в гранитах рапакиви, а также специфические линзовидные криптопертиты размером от 0.325 до 1 мк [19, 22].

#### Морфологические особенности овоидов КППШ и порфиоровидного кварца в метасоматических гибридных породах

Овоиды КППШ и кристаллы порфиоровидного кварца в ассоциации с гранитами рапакиви известны и в метасоматических гибридных породах. Так, в экзоконтакте Салминского массива рапакиви в ороговикованных брекчиях по кварц-биотит-плагиоклазовым сланцам ковадъярвинской серии встречаются овоидоподобные мегакристаллы КППШ (до 8 см в поперечнике), в том числе окаймленные плагиоклазовыми оболочками, а округлые порфиробласты кварца достигают 3 см в поперечнике [9, 22] (рис. 5).

Порфиробласты имеют метасоматическую природу, и их формирование связано с воздействием флюидов, отщепленных от гранитной магмы рапакиви, на вмещающие роговики. Это подтверждается изотопно-геохимическими данными о возрасте и источнике вещества для метасоматических порфиробласт К-полевого шпата в роговиках. Изотопно-геохимическое исследование различных зон КППШ, плагиоклаза оболочки на метакристаллах и минералов из основной массы роговиков показало возрастную зависимость Rb—Sr изотопных данных для породообразующих минералов метасоматитов ( $T = 1515 \pm 54$  млн лет,  $I_{SR} = 0.7168 \pm 0.0011$ , СКВО = 4.2) [9]. При этом U—Pb возраст цирконов из гранитов рапакиви Сал-

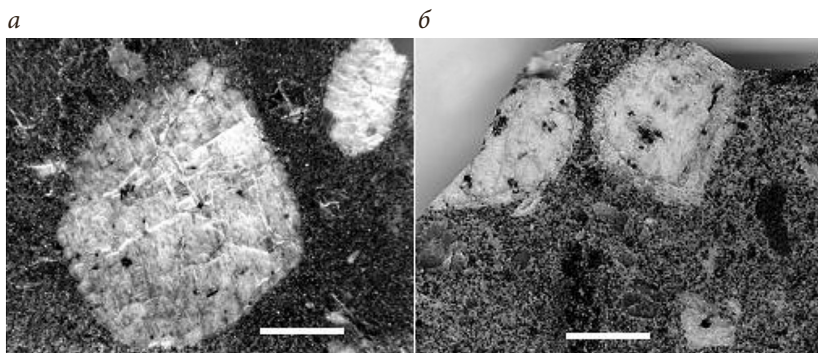


Рис. 5. Порфиробласты КПШ в ороговикованных брекчиях: *а* — овоидоподобные кристаллы КПШ и порфиroidного кварца; *б* — овоидоподобные кристаллы КПШ, окруженные плагиоклазовыми оболочками. Масштабная линейка — 1 см

минского массива составляет  $1543 \pm 8$  млн лет [2]. Приведенные данные позволяют считать, что часть вещества метакристаллов была принесена флюидом, отделявшимся при формировании интрузива гранитов рапакиви. Кристаллизация плагиоклазовых оболочек на порфиробластах КПШ в роговиках, вполне вероятно, могла происходить одновременно с формированием плагиоклазовых оболочек на овоидах в гранитах рапакиви.

В Бердяушском массиве овоидные граниты и сиениты рапакиви содержат ксенолиты гранитизированных габброидов, во внешних зонах которых присутствуют порфиробласты кварца и овоидоподобные мегакристаллы КПШ, окруженные плагиоклазовыми оболочками (рис. 6, *а*). При этом некоторые порфиробласты кварца облекаются каймой из мелких зерен амфибола подобно глазковому кварцу в гибридных магматических породах (рис. 6, *б*, *в*). Весьма примечательно, что подобный глазковый кварц встречается и в самих гранитах рапакиви (рис. 6, *г–е*).

U—Pb возраст цирконов из ксенолитов показал значение  $1380.4 \pm 2.2$  млн лет, тогда как циркон из порфиробласта КПШ с плагиоклазовой оболочкой из гранита рапакиви оказался значительно моложе:  $1353.2 \pm 5.3$  млн лет. Поэтому габброиды из ксенолитов и гибридные овоидсодержащие монцониты не могут принадлежать к единой магматической габбро-гранитной серии пород, как считают некоторые исследователи [1, 2].

В составе Салминского комплекса между ранними интрузиями габбро-норитов (U—Pb возраст апатита  $1563 \pm 9$  млн лет) и более поздними гранитами рапакиви (U—Pb возраст цирконов  $1543 \pm 8$  млн лет) [2] также присутствуют монцониты и монцо-сиениты, в которых постоянно присутствует КПШ в мезостазисе габбровой структуры и в виде мегакристаллов до 1–2 см в поперечнике (рис. 7), весьма неравномерно распределенных в породе.

Вместе с тем некоторые авторы также относят монцониты к единой магматической габбро-гранитной серии пород несмотря на существенную разницу в возрасте [1, 2].

В принципе КПШ мегакристаллов в монцонитах могут быть ксенокристами, попавшими туда в процессе смешения гранитной и базитовой магм, или порфиробластами, образовавшимися в результате метасоматической гранитизации (оквар-



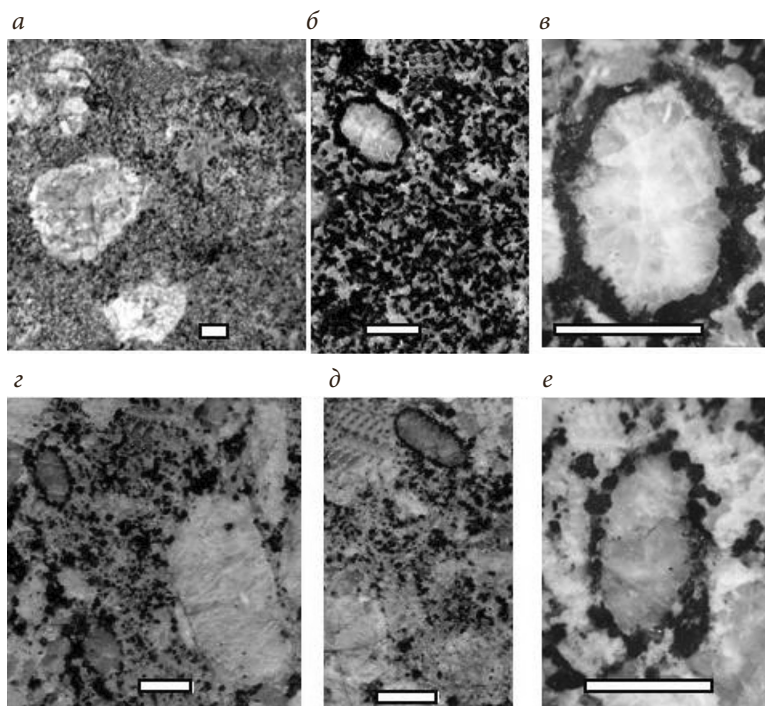


Рис. 6. Порфиробласты КППШ и «глазкового» кварца в гранитизированных ксенолитах габброидов и гранитах рапакиви Бердяушского комплекса: а — овоидоподобный кристалл КППШ в гранитизированном габбро-диорите, окруженный плагиоклазовой оболочкой; б — порфиробласт «глазкового» кварца, окруженный каймой из мелких кристаллов амфибола; в — «глазковый» кварц в габбро; г-е — «глазковый» кварц в овоидных гранитах рапакиви. Масштабная линейка — 1 см

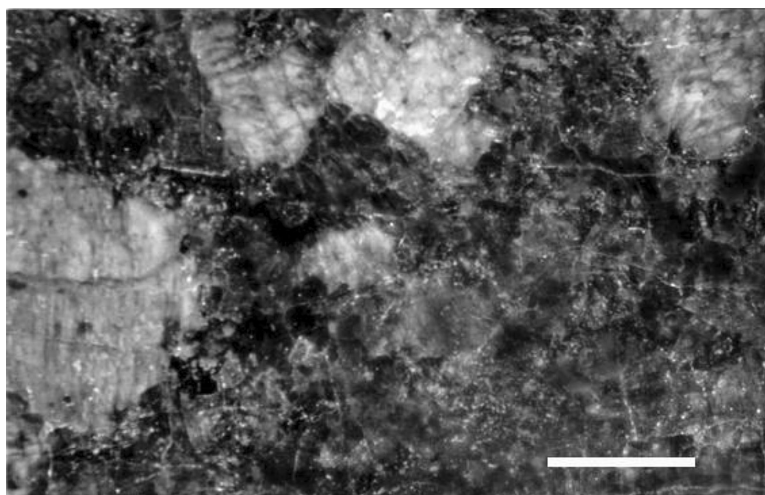


Рис. 7. Мегакристы КППШ в монцонитах Салминского комплекса рапакиви. Масштабная линейка — 1 см

цевания и калишпатизации) ранних габброидов флюидом, отделившимся от магмы рапакиви. Кроме того, КППШ в монцонитах могли полностью кристаллизироваться из расплава. Содержание Ba, Rb и Sr мегакрист КППШ из монцонитов практически идентично КППШ из центральных частей овоидов гранитов рапакиви, впрочем, как и порфировобластам КППШ в роговиках.

### Структурные особенности КППШ из гранитов рапакиви и различных по генезису композитных гибридных пород

Таким образом, несмотря на морфологическое подобие, КППШ и порфировидный кварц из гранитов рапакиви и различных по генезису композитных гибридных пород должны различаться структурными особенностями. Ксенокристаллы минералов, попавшие в основной расплав, должны были подвергаться значительному нагреву и быстрому охлаждению, тогда как метасоматические порфировобласты КППШ и кварца кристаллизовались из растворов с более низкой температурой, чем гранитный расплав.

Нами было проведено сравнительное изучение структурного состояния КППШ овоидов гранитов рапакиви, монцонитов, ксенокристаллов из гибридных магматических пород (Салминский и Аландский массивы), а также метасоматических овоидоподобных кристаллов в роговиках (Салминский массив) и гранитизированных ксенолитах (Бердяушский массив). На рентгеновском дифрактометре ДРОН-2.0 ( $\text{Cu}_{\text{K}\alpha}$ , 35 kv, 20 ma) КППШ из перечисленных пород изучались в обычном состоянии по стандартной методике, а затем исследованные образцы прокаливались в платиновом тигле в муфельной печи при температуре 900 °С в течение 8 ч, после чего снова определялось их структурное состояние [19, 22]. Результаты исследований приведены в табл. 2.

Таблица 2. Структурное состояние калиевых полевых шпатов гранитов рапакиви и родственных гибридных пород ( $T_1$  — степень упорядоченности)

Порода	Исходный КППШ			КППШ после прокаливания		
	$T_1$	Общий состав КППШ	Альбит в ортоклазе, %	$T_1$	Общий состав КППШ	Альбит в ортоклазе, %
	Салминский массив					
Рапакиви	0.71	Or100	12	0.73	Or100	10
Монцонит	0.73	Or100	14	0.73	Or100	10
Диабаз	0.73	Ab38 Or62	0	0.73	Ab10 Or90	26
	0.72	Ab35 Or65	0	0.70	Ab10 Or90	22
Роговик	0.71	Ab28 Or72	3	0.72	Ab28 Or72	4
Бердяушский массив						
Рапакиви	0.66	Ab15 Or85	15	0.66	Ab15 Or85	12
Ксенолит габбро	0.61	Ab15 Or85	15	0.62	Ab15 Or85	15
Аландский массив						
Рапакиви	0.78	Ab15 Or85	4	0.78	Or100	26
Мафические включения	0.79	Ab30 Or70	5	0.79	Ab10 Or90	26

Все изученные полевые шпаты гранитов рапакиви и родственных пород представлены ортоклазом, в котором наблюдаются ленточные пертиты альбита (10–15 %). Кроме того, калий-натриевый ортоклаз овоидов гранитов рапакиви, а также метасоматических овоидоподобных кристаллов из Салминского и Бердяушского массивов содержит в своей структуре от 12 до 15 % альбитового минала. После прокаливании образцов овоидов из гранитов рапакиви в муфельной печи степень упорядоченности КППШ ( $T_1$ ) практически не изменилась, а содержание альбитового компонента в структуре ортоклаза даже немного снизилось [19, 22].

В овоидоподобных метасоматических КППШ из роговиков и гранитизированных ксенолитов габброидов степень упорядоченности и содержание альбитового компонента в структуре ортоклаза не изменились после прокаливании образцов. Следует отметить, что  $T_1$  для КППШ метакристаллов из роговиков и овоидов гранитов рапакиви практически совпадают, что может быть результатом близких температур образования КППШ.

В составе ортоклаза КППШ овоидов-ксенотриптитов из гибридных магматических диабазов Салминского массива альбитовый компонент практически отсутствует. После прокаливании образцов содержание альбитового компонента в структуре ортоклаза увеличилось до 22–26 %. Подобное явление установлено и для КППШ из гранитов и ксенотриптитов мафических включений Аландского массива: содержание альбитового компонента в структуре ортоклаза увеличилось после прокаливании с 4–5 до 26 %.

Обнаруженное явление объясняется тем, что ксенотриптиты КППШ, попавшие из магмы гранитов рапакиви в высокотемпературный основной расплав, были нагреты до температур более 900 °С. При последующем, достаточно быстром остывании КППШ претерпели вторичный распад твердого раствора в РТ-области высокотемпературного сольвуса (около 800 °С). При этом структура КППШ освобождается от содержащегося в ней альбитового компонента и появляются новообразованные рентгеновские криптоптиты, которые (по сравнению с ранними ленточными пертитами овоидов) не имеют четких фазовых границ и при нагревании могут быстро «растворяться». Таким образом, при нагревании до высоких температур и последующем быстром охлаждении К-На полевого шпата виртуальный альбитовый компонент переходит в реальный альбит рентгеновских криптоптитов, а при прокаливании образцов Na снова входит в структуру ортоклаза. Следует отметить, что альбит из ленточных пертитов и при нагревании и при прокаливании практически не реагирует с ортоклазом, из-за наличия четких фазовых границ.

Присутствие криптоптитов в КППШ гранитов рапакиви Аландского массива связано с тем, что образцы для исследования отбирались в непосредственной близости от магматогенных мафических включений. Вероятно, исходный для этих включений высокотемпературный базитовый расплав нагревал вмещающую гранитную магму и кристаллы КППШ до температур выше 800 °С.

Таким образом, структурное состояние КППШ гибридных пород комплекса рапакиви (наличие или отсутствие в них рентгеновских криптоптитов альбита) может однозначно указывать на их магматическое или метасоматическое происхождение. Поскольку КППШ из монцититов Салминского массива не содержат рентгеновских криптоптитов, то наиболее вероятно, что эти монцититы представляют собой композитные гибридные породы, образовавшиеся в результате

гранитизации — метасоматического преобразования более ранних габбро-анортозитов кремне-калиевым флюидом, возможно, отделившимся от магмы рапакиви.

### Структурные особенности порфировидного кварца гранитов рапакиви и различных по генезису гибридных пород

Мы провели сравнительное изучение флюидных включений в порфировидном кварце овоидных гранитов рапакиви и в ксеногенном кварце из магматических гибридных пород Салминского массива [6]. Состав флюидных включений ( $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$  и их суммарная масса) в кварце определяли методом масс-спектрального термического анализа по мере декрипитации с нагревом; положение пиков декрипитации было сопоставимо с температурами гомогенизации включений. Для порфировидного кварца рапакиви характерно наличие двух пиков массового вскрытия газовой-жидкой фазы включений. Пик при температуре  $T_1 = 525^\circ\text{C}$  соответствует декрипитации первичных включений с температурами гомогенизации ( $T_{\text{гом}}$ ) около  $490\text{--}540^\circ\text{C}$ ; вскрытие вторичных цепочечных включений происходило при  $T_2 = 420^\circ\text{C}$ , значения  $T_{\text{гом}}$  лежат в интервале  $210\text{--}380^\circ\text{C}$  (рис. 8, а).

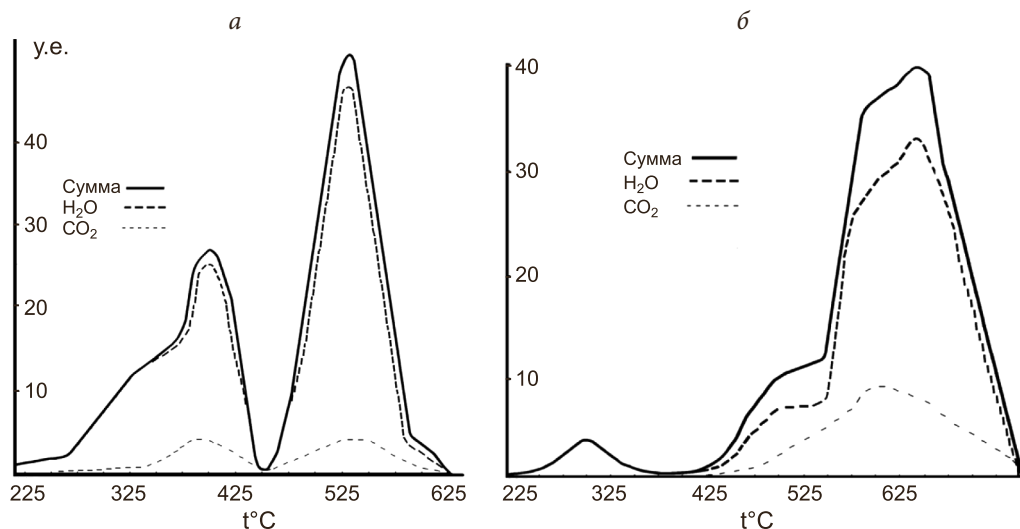


Рис. 8. Графики зависимости состава и выхода массовой доли газовой-жидкой фазы ( $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$  и их суммарной массы, в условных единицах — у.е.) от температуры декрипитации флюидных включений в порфировидном кварце из пород Салминского массива: а — кварц из гранитов рапакиви, б — ксеногенный кварц из гибридной базальтовой дайки

Для включений в ксеногенном кварце из базитовой дайки фиксируется область декрипитации в интервале  $570\text{--}750^\circ\text{C}$  с максимумом при  $T_3 = 650^\circ\text{C}$  (рис. 8, б).

Полученные данные позволяют сделать вывод, что при быстром прогреве ксенокристаллов кварца, попавших в основной расплав, происходила декрипитация флюидных включений в минерале и образование вторичных — высокотемпературных. Их состав отражает потери более летучих газов. Появление подобных микро-включений является индикатором процессов магматического смешения и может быть использовано при расшифровке петрогенезиса гибридных пород.



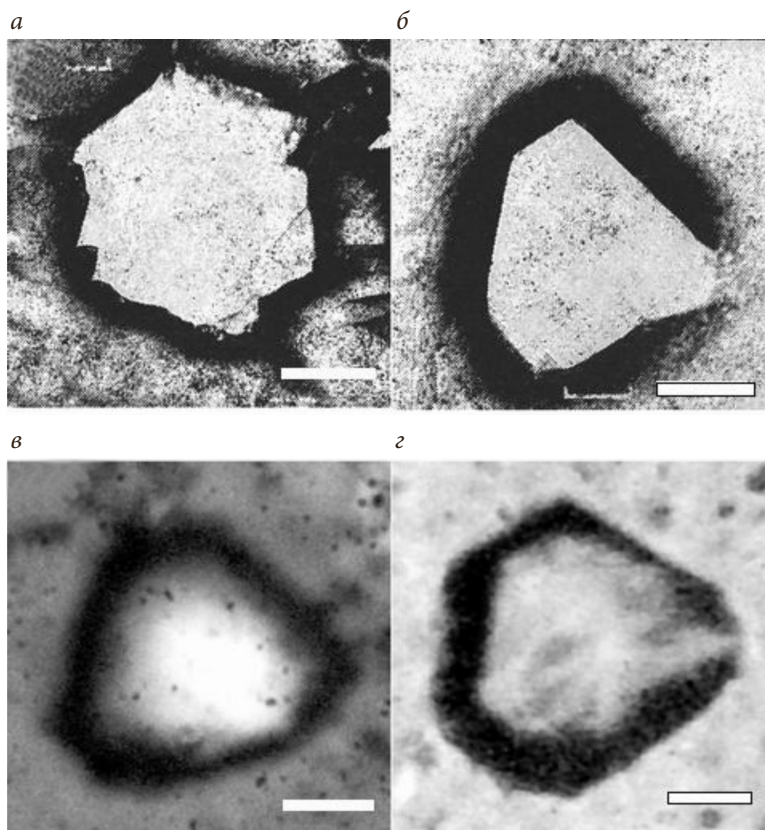


Рис. 9. Первичные включения в виде отрицательных кристаллов: *а* — полость включения гексагональной симметрии в  $\beta$ -кварце из вкрапленников в кварцевых порфирах Закавказья (Кафан, Самшвилдо); *б* — полость включения тригональной симметрии в  $\alpha$ -кварце хрусталеносных жил Приполярного Урала (изображения во вторичных электронах РЭМ) [24]; *в* — полость включения тригональной симметрии в  $\alpha$ -кварце из роговиков зоны экзоконтакта Салминского массива; *г* — полость включения тригональной симметрии в  $\alpha$ -кварце из гранитизированных ксенолитов габброидов в Бердяушском массиве (изображения в проходящем свете в шлифах). Масштабная линейка — 10 мкм

Газово-жидкие включения в порфировидном кварце из биотит-роговообманковых гранитов рапакиви Бердяушского массива и из гранитизированных ксенолитов габброидов идентичны по морфологии, соотношениям первичных и вторичных, содержащих углекислоту, и водно-солевым включениям, степени их заполненности газовой фазой. Максимальные температуры гомогенизации первичных включений в кварце метасоматитов и гранитов одинаковы и составляют 490–520 °С. Таким образом, с учетом максимальной поправки на давление ( $P = 2$  кбар, по данным Amph-Pl-Qtz-термобарометрии), температура формирования порфировидного кварца в породах не превышала 600–640 °С [23].

Для оценки температур кристаллизации горных пород можно также использовать температуры полиморфных переходов модификаций низкотемпературного тригонального  $\alpha$ -кварца в высокотемпературный гексагональный  $\beta$ -кварц. Тем-

температура  $\alpha$ — $\beta$ -перехода кварца соответствует  $573 \pm 2^\circ$  при давлении 1 атм. Ниже этой температуры всегда устойчива низкотемпературная тригональная модификация  $\alpha$ -кварца. Температура  $\alpha$ — $\beta$ -перехода кварца при повышении давления на каждую тысячу атмосфер увеличивается на  $20\text{--}22^\circ$  [24]. Известно, что симметрия полостей первичных включений в виде отрицательных кристаллов соответствует симметрии включающего их минерала-хозяина и может использоваться как один из признаков отличия первичного низкотемпературного  $\alpha$ -кварца от высокотемпературного  $\beta$ -кварца. Для  $\alpha$ -кварца морфология полостей первичных включений в виде отрицательных кристаллов соответствует тригональной симметрии, а  $\beta$ -модификации — гексагональной (рис. 9, а, б) [24]. Такие включения можно наблюдать в шлифах, перпендикулярных оси симметрии главного порядка, —  $L_3$  разрез для  $\alpha$ -кварца и  $L_6$  для его  $\beta$ -модификации.

Изучение кварца из роговиков зоны экзоконтакта Салминского массива и глазкового кварца из гранитов и гранитизированных ксенолитов габброидов в Бердяушском массиве показало, что в них присутствуют первичные включения (отрицательные кристаллы) тригональной симметрии, характерные для низкотемпературного  $\alpha$ -кварца. Следовательно, глазковый кварц из гранитизированных ксенолитов габброидов и гранитов рапакиви Бердяушского массива кристаллизовался из метасоматических флюидов (рис. 9, в, г).

### Выводы

1. Структурные особенности КПШ и порфировидного кварца позволяют однозначно дифференцировать композитные гибридные породы различного генезиса и определить их отношение к гранитам рапакиви.

2. Овоиды КПШ и плагиоклазовые оболочки на них в гранитах рапакиви были сформированы до начала кристаллизации остаточного котектического расплава. При этом, центрами кристаллизации для овоидов и порфировидного кварца могли служить интрателлурические вкрапленники.

3. В процессе формирования магматогенных композитных гибридных пород ксенокристаллы-овоиды КПШ при дополнительном нагревании в основном расплаве претерпели распад твердого раствора в РТ-области высокотемпературного сольвуса с образованием вторичных рентгеновских криптопертитов альбита. При этом в ксенокристаллах кварца происходила декрипитация первичных и образование новых вторичных высокотемпературных флюидных включений.

4. В гибридных композитных метасоматитах, сформировавшихся по метаморфическим и основным магматическим породам, овоидоподобные порфиробласты КПШ (в том числе, с плагиоклазовыми оболочками), а также порфировидный кварц (в том числе, глазковый) кристаллизовались из растворов. При этом в кристаллах кварца присутствуют первичные включения (отрицательные кристаллы) тригональной симметрии, характерные для низкотемпературной  $\alpha$ -модификации.

### Благодарности

Автор выражает благодарность коллегам, в содружестве с которыми выполнялись отдельные части данной работы: Н. Г. Ергош, А. С. Кирилову, А. М. Ларину,

В.М.Саватенкову, О.Г.Сметанниковой, А.Д.Шебанову, а также Олаву Эклунду за предоставленные для исследования образцы пород комплекса Хаммаруда.

## Литература

1. Великославинский Д. А., Великославинский С. Д. Бердяушский плутон овоидных гранитов: вещественный состав и геодинамическое положение // Записки ВМО. 2003. Ч. 27, № 3. С. 1–15.
2. Ларин А. М. Граниты рапакиви и ассоциирующие породы. СПб.: Наука, 2011. 403 с.
3. Шарков Е. В. Протерозойские анортозит-рапакивигранитные комплексы Восточно-Европейского кратона — пример внутриплитного магматизма в условиях аномально мощной сиалической коры // Литосфера. 2005. № 4. С. 3–21.
4. Ronkin Yu. L., Maslov A. V., Kazak A. P. The Lower–Middle Riphean Boundary in the Southern Urals: New Isotopic U–Pb (SHRIMP II) Constraints // Reports of Earth Sciences. 2007. Vol. 415A, N 6. P. 835–840.
5. Müller A., Seltnann R., Kober B. et al. Compositional zoning of rapakivi feldspars and coexisting quartz phenocrysts // Can. Min. 2008. Vol. 46. P. 1417–1442.
6. Kirilov A. S., Belyaev A. M., Shebanov A. D. et al. Gas composition of fluid inclusions as an indicator of interaction process between mafic and rapakivi granite magmas // Rapakivi Granites and Related Rocks: Correlation on a Global Scale (Abstr. Vol. IGCP-315 Symp.). Helsinki, Finland, 1996. P. 35.
7. Eklund O., Fröjdö S., Lindberg B. Magma mixing, the petrogenetic link between anorthositic suites and rapakivi granites, Åland, SW Finland // Mineral. Petrol. 1994. Vol. 50. P. 3–19.
8. Belyaev A. M., Neymark L. A., Shebanov A. D. et al. Age and origin of mafic xenoliths from rapakivi granites of the Berdiaush massif (S. Urals, Russia) // Rapakivi Granites and Related Rocks: Correlation on a Global Scale (Abstr. Vol. IGCP-315 Symp.). Helsinki, Finland, 1996. P. 6.
9. Savatenkov V. M., Shebanov A. D., Belyaev A. M. Age, source, and conditions of formations of phenocryst-like quartz and ovoid-like alkali feldspar megacrysts in an altered hornfels at the contact aureole of the Salmi rapakivi batholith, Russian Karelia // Rapakivi Granites and Related Rocks: Correlation on a Global Scale (Abstr. Vol. IGCP-315 Symp.). Helsinki, Finland, 1996. P. 62.
10. Беляев А. М. Петрология вулканизов формации рапакиви (о. Гогланд) // Региональная геология и металлогения. 2013. № 55. С. 28–36.
11. Salonsaari P. T. Hybridization in the subvolcanic Jaala-Iitti complex and its petrogenetic relation to rapakivi granites and associated mafic rocks of southern Finland // Bull. Geol. Soc. Finland. 1995. N 67. 104 p.
12. Свириденко Л. П. Граниты рапакиви фенноскандинавского щита (на примере Карелии) // Труды Карельского научного центра РАН. 2014. № 1. С. 17–27.
13. Ramo O. T., Naapala I. One hundred years of Rapakivi Granites // Mineralogy and Petrology. 1995. Vol. 52. P. 129–185.
14. Анортозит — рапакивигранитная формация Восточно-Европейской платформы / под ред. Д. А. Великославинского. Л.: Наука, 1978. 296 с.
15. Левковский Р. З. Рапакиви. Л.: Недра, 1975. 230 с.
16. Судовиков Н. Г. Проблема рапакиви и позднеорогенных интрузий. М.; Л., 1967. 118 с.
17. Belyaev A. M. Petrogenesis of rapakivi granites and related rocks // Rapakivi granites and related rocks: Abstr. Vol. Symp. IGCP-315. Helsinki, Finland, 1991. P. 6.
18. Беляев А. М., Шебанов А. Д. Особенности петрогенезиса орбикулярных гранитов рапакиви Салминского массива (Карелия) // Образование и локализация руд в земной коре. СПб.: Изд-во С.-Петерб. ун-та, 1999. С. 295–301.
19. Беляев А. М., Ермош Н. Г. К вопросу о происхождении овоидов гранитов рапакиви // Материалы юбилейной научной сессии к 100-летию Н. Г. Судовикова. СПб., 2003. С. 41–44.
20. Nekvasil H. Ascent of felsic magmas and formation of rapakivi // Am. Miner. 1991. Vol. 76. P. 1279–1290.
21. Eklund O., Shebanov A. D. The origin of the rapakivi textures by subisothermal decompression // Precambrian Res. 1999. Vol. 95. P. 129–146.
22. Беляев А. М., Ермош Н. Г., Сметанникова О. Г. Структурные особенности полевых шпатов гранитов рапакиви и связанных с ними пород // II Всероссийское петрографическое совещание. Тезисы докладов. Т. 3. Сыктывкар, 2000. С. 22–23.
23. Шебанов А. Д., Порицкий М. С. Морфология, свойства и генерации кварца в гранитах рапакиви (на примере Выборгского и Бердяушского массивов) // Записки РМО. 1993. Ч. 122, вып. 4. С. 77–89.

24. Союшкин В. Е. Электронная микроскопия включений минералообразующей среды в кварце // Известия Академии наук СССР, серия геологическая. 1981. № 1. С. 85–95.

Для цитирования: Беляев А. М. К вопросу о генезисе овоидов К-полевого шпата и порфировидного кварца в гранитах рапакиви и родственных породах // Вестник СПбГУ. Науки о Земле. 2017. Т. 62. Вып. 1. С. 3–19. DOI: 10.21638/11701/spbu07.2017.101.

## References

1. Velikoslavinsky D. A., Velikoslavinsky S. D. Berdiaushskii pluton ovoidnykh granitov: veshchestvennyi sostav i geodinamicheskoe polozhenie [Berdiaushsky pluton of ovoid granites: its composition and geodynamic setting]. *Zapiski VMO*, 2003, pt. CXXXII, no. 3, pp. 1–15. (In Russian)
2. Larin A. M. *Granity rapakivi i assotsiiruiushchie porody* [Granites rapakivi and connected rocks]. St. Petersburg, Nauka Publ., 2011. 403 p. (In Russian)
3. Sharkov E. V. Proterozoiskie anortozit-rapakivigranitnye komplekсы Vostochno-Evropeiskogo kratona — primer vnutripitnogo magmatizma v usloviakh anomal'no moshchnoi sialicheskoi kory [Proterozoic anorthosite-rapakivi granite complexes of the East-European craton — an example of within-plate magmatism under conditions of anomalously thick sialic crust]. *Litosfera* [Lithosphere], 2005, no. 4, pp. 3–21. (In Russian)
4. Ronkin Yu. L., Maslov A. V., Kazak A. P. The Lower–Middle Riphean Boundary in the Southern Urals: New Isotopic U–Pb (SHRIMP II) Constraints. *Doklady Earth Sciences*, 2007, vol. 415A, no. 6, pp. 835–840.
5. Müller A., Seltnann R., Kober B. et al. Compositional zoning of rapakivi feldspars and coexisting quartz phenocrysts. *Can. Min.*, 2008, vol. 46, pp. 1417–1442.
6. Kirilov A. S., Belyaev A. M., Shebanov A. D. et al. Gas composition of fluid inclusions as an indicator of interaction process between mafic and rapakivi granite magmas. *Rapakivi Granites and Related Rocks: Correlation on a Global Scale (Abstr. Vol. IGCP-315 Symp.)*. Helsinki, Finland, 1996, p. 35.
7. Eklund O., Fröjdö S., Lindberg B. Magma mixing, the petrogenetic link between anorthositic suites and rapakivi granites, Åland, SW Finland. *Mineral. Petrol.*, 1994, vol. 50, pp. 3–19.
8. Belyaev A. M., Neymark L. A., Shebanov A. D. et al., Age and origin of mafic xenoliths from rapakivi granites of the Berdiaush massif (S. Urals, Russia). *Rapakivi Granites and Related Rocks: Correlation on a Global Scale (Abstr. Vol. IGCP-315 Symp.)*. Helsinki, Finland, 1996, p. 6.
9. Savatenkov V. M., Shebanov A. D., Belyaev A. M. Age, source, and conditions of formations of phenocryst-like quartz and ovoid-like alkali feldspar megacrysts in an altered hornfels at the contact aureole of the Salmi rapakivi batholith, Russian Karelia. *Rapakivi Granites and Related Rocks: Correlation on a Global Scale (Abstr. Vol. IGCP-315 Symp.)*. Helsinki, Finland, 1996, p. 62.
10. Belyaev A. M. Petrologiia vulkanitov formatsii rapakivi (o. Gogland) [Petrology of volcanic rocks from the rapakivi formation (Island Hogland)]. *Regional'naiia geologiia i metallogeniia* [J. Regional Geology and Metallogeny], 2013, no. 55, pp. 28–36. (In Russian)
11. Salonsaari P. T. Hybridization in the subvolcanic Jaala-Iitti complex and its petrogenetic relation to rapakivi granites and associated mafic rocks of southern Finland. *Bull. Geol. Soc. Finland*, 1995, no. 67. 104 p.
12. Sviridenko L. P. Granity rapakivi fennoskandinavskogo shchita (na primere Karelii) [The rapakivi granites of the Fennoscandian Shield (the case of Karelia)]. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN* [Transactions Karelian Research Centre RAS], 2014, no. 1, pp. 17–27. (In Russian)
13. Ramo O. T., Haapala I. One hundred years of Rapakivi Granites. *Mineralogy and Petrology*, 1995, vol. 52, p. 129–185.
14. Anortozit — rapakivigranitnaia formatsiia Vostochno — Evropeiskoi platformy [Anorthosit-rapakivi granites formation of the East-European craton]. Ed. by D. A. Velikoslavinsky. Leningrad, Nauka Publ., 1978. 296 p. (In Russian)
15. Levkovski R. Z. *Rapakivi*. Leningrad, Nedra Publ., 1975. 230 p. (In Russian)
16. Sudovikov N. G. *Problema rapakivi i pozdneorogennykh intruzii* [The problem of rapakivi and post-orogenic intrusions]. Moscow, Leningrad, 1967. 118 p. (In Russian)
17. Belyaev A. M. Petrogenesis of rapakivi granites and related rocks. *Rapakivi granites and related rocks: Abstr. Vol. Symp. IGCP-315*. Helsinki, Finland, 1991, p. 6.
18. Belyaev A. M., Shebanov A. D. [Petrogenesis feature of the orbicular rapakivi granites from Salmi pluton (Karelia)]. *Obrazovanie i lokalizatsiia rud v zemnoi kore* [Forming and allocation ores in the Earth crust]. St. Petersburg, St. Petersburg Univ. Press, 1999, pp. 295–301. (In Russian)



19. Belyaev A. M., Ermosh N. G. [To question of ovoides from rapakivi granites origin]. *Materialy iu-bileinoi nauchnoi sessii k 100-letiiu N. G. Sudovikova* [Materials of the jubilee scientific meeting to 100<sup>th</sup> anniversary of the N. G. Sudovikov]. St. Petersburg, St. Petersburg Univ. Press, 2003, pp. 41–44. (In Russian)
20. Nekvasil H. Ascent of felsic magmas and formation of rapakivi. *Am. Miner.*, 1991, vol. 76, pp. 1279–1290.
21. Eklund O., Shebanov A. D. The origin of the rapakivi textures by subisothermal decompression. *Precambrian Res.*, 1999, vol. 95, pp. 129–146.
22. Belyaev A. M., Ermosh N. G., Smetannikova O. G. [Structural Features K-feldspar of the Rapakivi Granites and Related Rocks]. *II Vserossiiskoe petrograficheskoe soveshchanie. Tezisy dokladov. Tom 3* [II All-Russian petrography meeting. Vol. 3]. Syktyvkar, 2000, pp. 22–23. (In Russian)
23. Shebanov A. D., Poritsky M. S. Morfologiya, svoystva i generatsii kvartsa v granitakh rapakivi: (na primere Vyborgskogo i Berdiaushskogo massivov) [Morphology, properties and generations of quartz in rapakivi granites (example of Wiborg and Berdyaushsky plutons)]. *Zapiski VMO*, 1993, pt. 122, issue 4, pp. 77–89. (In Russian)
24. Soniushkin V. E. Elektronnaia mikroskopiia vklucheni mineraloobrazuiushchei sredy v kvartse [Electron microscopy of inclusions of mineral-forming environment in quartz]. *Izvestiia Akademii nauk SSSR, seriia geologicheskaya* [Proceedings of the Academy of Sciences of the USSR, series geological], 1981, no. 1, pp. 85–95 (In Russian).

**For citation:** Belyaev A. M. About the genesis of ovoidal K-feldspar porphyry and quartz in rapakivi granites and related rocks. *Vestnik SPbSU. Earth Sciences*, 2017, vol. 62, issue 1, pp. 3–19. DOI: 10.21638/11701/spbu07.2017.101.

Статья поступила в редакцию 1 ноября 2016 г.

Статья рекомендована в печать 1 марта 2017 г.

#### Контактная информация

Беляев Анатолий Михайлович — кандидат геолого-минералогических наук, доцент;  
a.beliae@spbu.ru

Belyaev Anatoly M. — PhD, Associate Profesor; a.beliae@spbu.ru